



**TUGAS AKHIR TF-141581**

**ANALISIS KOMPOSISI PEMBAKARAN PADA  
PROSES PEMBUATAN *CLINKER* DI PABRIK  
TUBAN I PT SEMEN INDONESIA (PERSERO)  
TBK BERBASIS *COMPUTATIONAL FLUID  
DYNAMICS***

**ENDAH LAKSMI NUGRAHA**  
NRP. 2412 100 015

Dosen Pembimbing  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Ir. Sarwono, MM.

JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT TF-141581**

**ANALYSIS OF COMBUSTION COMPOSITION  
IN CLINKER PRODUCTION AT PABRIK  
TUBAN 1 PT SEMEN INDONESIA (PERSERO)  
TBK BASED ON COMPUTATIONAL FLUID  
DYNAMICS**

**ENDAH LAKSMI NUGRAHA**  
NRP. 2412 100 015

Supervisor  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Ir. Sarwono. MM.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

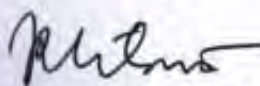
**ANALISIS KOMPOSISI PEMBAKARAN PADA PROSES  
PEMBUATAN *CLINKER* DI PABRIK TUBAN I PT SEMEN  
INDONESIA (PERSERO) TBK BERBASIS  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

**TUGAS AKHIR**

Oleh:  
**ENDAH LAKSMI NUGRAHA**  
**NRP: 2412 100 015**

Surabaya, 20 Juli 2016  
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I,



**Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**  
**NIPN. 19761223 200501 1 001**

Pembimbing II,



**Ir. Sarwono, MM.**  
**NIPN. 19580530 198303 1 002**



**ANALISIS KOMPOSISI PEMBAKARAN PADA PROSES  
PEMBUATAN CLINKER DI PABRIK TUBAN I PT SEMEN  
INDONESIA (PERSERO) TBK BERBASIS  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**


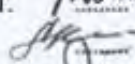

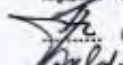

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ENDAH LAKSMI NUGRAHA**  
**NRP. 2412 100 015**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Ir. Sarwono, M.M  (Pembimbing II)
3. Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D  (Penguji I)
4. Ir. Roekmono, M.T.  (Penguji II)
5. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.  (Penguji III)

**SURABAYA**  
**JUNI 2016**

**ANALISIS KOMPOSISI PEMBAKARAN PADA PROSES  
PEMBUATAN *CLINKER* DI PABRIK TUBAN I PT SEMEN  
INDONESIA (PERSERO) TBK BERBASIS  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

**Nama Mahasiswa : Endah Laksmi Nugraha**  
**NRP : 2412 100 015**  
**Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Ir. Sarwono, MM.**

**Abstrak**

Industri semen merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca di Indonesia. Untuk mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dalam produksi semen, pada pabrik Tuban I khususnya pada *preheater SLC*, menggunakan konsep *co-firing* dimana menggunakan dua jenis bahan bakar yang berbeda. Pembakaran *co-firing* merupakan pembakaran serentak dua bahan bakar atau lebih. Sekam digunakan sebagai bahan bakar alternative dalam pembakaran *cofiring* ini bersama dengan batubara sebagai bahan bakar utama. Sifat sekam yang memiliki nilai volatile yang tinggi serta karbon yang rendah akan membantu pengurangan emisi khususnya emisi karbon namun tetap mempunyai hasil pembakaran yang maksimal. Dari penelitian digunakan variasi sekam sebanyak 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, dan 15% dari total penggunaan bahan bakar selama proses pembakaran di *calciner*. Dari penelitian diperoleh bahwa komposisi pembakaran paling efisien pada variasi 15%. Dimana suhu hasil pembakaran tetap terjaga dengan emisi CO dan CO<sub>2</sub> yang menurun.

***Kata kunci : cofiring, sekam, pembakaran, calciner, cfd***

# **ANALYSIS OF COMBUSTION COMPOSITION IN CLINKER PRODUCTION AT PABRIK TUBAN 1 PT SEMEN INDONESIA (PERSERO) TBK BASED ON COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

**Name** : Endah Laksmi Nugraha  
**NRP** : 2412 100 015  
**Department** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Supervisor** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Ir. Sarwono, MM.

## **Abstract**

*Cement manufacture is one of the biggest contributor green house gases in Indonesia. For decreasing its emission in their cement production, Pabrik Tuban I used cofiring combustion in SLC Preheater. Co firing combustion is combustion of two or more fuels at once in the same furnace. Rice husk is used as alternaive fuel in this combustion, together with coal as main fuel. Characteristic of rice husk that has high volatile matter and low carbon is being used for decreasing green house emission with maintaining the energy consumption of clinker production. In this research rice husk composition is vary in 5% until 15% with 2.5 different. And for the result composition of cofiring combustion in this SL Calciner is at best on 15% variation of rice husk. It shiws tahat the temperature of combustion still catch the target and has low emission than other variation*

**Keywords** : *cofirng, rice husk, combustion, calciner, cfd*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir “Analisis Komposisi Pembakaran Pada Proses Pembuatan *Clinker* Di Pabrik Tuban I PT Semen Indonesia (Persero) Tbk Berbasis *Computational Fluid Dynamics*”. Selama melaksanakan tugas akhir dan menuliskan laporan tugas akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada.

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T, M.si, Phd. selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika, Intitut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan petunjuk dan bimbingan kepada penulis.
2. Bapak Ir. Zulkifli, Msc. selaku Dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan dan ilmu-ilmunya kepada penulis.
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T dan Bapak Ir. Sarwono, MM. selaku dosen pembimbing senantiasa memberikan bimbingan, motivasi dan saran dalam penyelesaian tugas akhir ini
4. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T, M.T, selaku KBM Energi serta kepala Laboraturium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah memberikan dukunganya kepada penulis.
5. Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dan bimbinganya selama penulis menuntut ilmu di Jurusan Teknik Fisika ITS.

Apabila terdapat kekurangan, penulis memohon kritik dan saran demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan ilmu bagi banyak orang.

Surabaya, 30 Mei 2016  
Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Proses Pembakaran	5
2.2 Bahan Bakar	6
2.3 Stokiometri Pembakaran	8
2.4 <i>Suspension Preheater</i>	9
2.5 <i>Computational Fluid Dynamics</i>	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	13
3.2 Perhitungan Numerik	14
3.3 Desain <i>Separate Calciner</i>	18
3.4 Simulasi	19
3.5 Validasi Hasil	24
3.6 Variasi Komposisi	24
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Validasi Hasil Simulasi	25
4.2 Efek Variasi Komposisi Variasi Sekam Terhadap Temperatur Pembakaran	25
4.3 Efek VARIasi Komposisi Sekam Terhadap Pollutan	31



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

35

### 5.2 Saran

35

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN

## BIODATA PENULIS

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> <i>In-Line Calciner</i>	10
<b>Gambar 2.2</b> <i>Separate Line Calciner</i>	11
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian	13
<b>Gambar 3.2</b> Geometri SL Calciner	19
<b>Gambar 3.3</b> <i>Set up Meshing</i>	20
<b>Gambar 3.4</b> Hasil <i>Meshing</i> Geometri <i>Calciner</i>	20
<b>Gambar 3.5</b> Konvergensi pada Simulasi CFD	23
<b>Gambar 4.1</b> Grafik Temperatur Terhadap Variasi Komposisi Sekam	26
<b>Gambar 4.2</b> Grafik Pollutan NO <sub>x</sub> Terhadap Variasi Komposisi Sekam	32
<b>Gambar 4.3</b> Grafik Perbandingan emisi CO dengan Variasi Sekam	33
<b>Gambar 4.4</b> Grafik Perbandingan emisi CO <sub>2</sub> dengan Variasi Sekam	34

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Jenis Proses Pembakaran Berdasarkan Mekanisme Kontak Bahan Bakar	6
<b>Tabel 2.2</b> <i>Stage</i> Pemanasan <i>Preheater</i>	12
<b>Tabel 3.1</b> Analisis Ultimasi dan Proksimasi (Ar) Batu Bara dan Sekam Padi	15
<b>Tabel 3.2</b> Analisis Ultimasi dan Proksimasi (DAF) Batu Bara dan Sekam Padi	16
<b>Tabel 3.3</b> Fraksi mol Bahan Bakar	16
<b>Tabel 3.4</b> Kecepatan Aliran Bahan Bakar Hasil Variasi Komposisi Sekam	18
<b>Tabel 3.5</b> Spesifikasi Geometri <i>Calcliner</i>	18
<b>Tabel 3.6</b> Model Simulasi pada ANSYS Fluent	21
<b>Tabel 3.7</b> Kondisi Batas Simulasi	22
<b>Tabel 3.8</b> Metode Simulasi pada Simulasi Pembakaran	22
<b>Tabel 4.1</b> Hasil Variasi Sekam Terhadap Suhu Pembakaran	26
<b>Tabel 4.2</b> Kontur Temperatur terhadap Variasi Sekam bidang XY	28
<b>Tabel 4.3</b> Kontur Temperatur terhadap Variasi Sekam bidang YZ	30

## DAFTAR SIMBOL

$\rho$	Massa Jenis
$\Delta H_c$	Entalpi Pembakaran
$\Phi$	<i>Flammability Limit</i>
AFR	Air to Fuel Ratio
$h_{fg}$	Entalpi Uap Air
K	Kelvin
m	Massa Uap Air
$\dot{m}_a$	<i>Mass Fraction Air</i>
$\dot{m}_f$	<i>Mass Fraction Fuel</i>

## DAFTAR SINGKATAN

AR	As Received
DAF	Dry Ash Free
DO	Discrete Ordinates
HHV	<i>High Heating Value</i>
LHV	<i>Low Heating Value</i>
VM	Volatile Matter

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Semen merupakan salah satu bahan penting dalam konstruksi sebuah bangunan. Semen berfungsi untuk merekatkan bahan bangunan lain contohnya, batu bata dan batako. Industri semen merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca di Indonesia. Secara umum industri semen di Indonesia menyumbang 0.833 ton CO<sub>2</sub> / ton semen <sup>[1]</sup>. Emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama proses kalsinasi dan pembakaran ini ikut mempengaruhi penentuan komposisi bahan bakar yang digunakan.

Dalam industri pembuatan semen, proses utama adalah proses pembakaran dimana terjadi reaksi kalsinasi, yaitu reaksi perubahan dari karbonat menjadi kalsium oksida dan karbon dioksida <sup>[2]</sup>. Proses kalsinasi terjadi saat *raw material* memasuki *preheater*, *rotary kiln*, dan *clinker cooler* yang akan menghasilkan *clinker* atau semen setengah jadi.

Produksi semen merupakan proses produksi yang membutuhkan banyak energi, terutama pada proses pembakaran. Dimana kebutuhan akan bahan bakar pada pembuatan *clinker* mencapai 38% dari total kebutuhan energi produksi <sup>[3]</sup>.

Pada proses kalsinasi membutuhkan panas yang bersumber dari pembakaran batu bara. Untuk mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dalam produksi semen, pada pabrik Tuban I khususnya pada *preheater SLC*, menggunakan konsep *co-firing* dimana menggunakan 2 jenis bahan bakar yang berbeda sehingga dapat mempengaruhi proses pembakaran pada pembuatan *clinker*. Pembakaran *co-firing* atau pembakaran serentak dapat mengurangi emisi hasil pembakaran, dan menambah penggunaan energi terbarukan serta melakukan penghematan energi dengan biaya yang rendah <sup>[4]</sup>. Namun dalam penggunaan pembakaran *co firing* banyak hal yang perlu dipertimbangkan agar mencapai hasil yang maksimal.

*Computational Fluid Dynamic* adalah ilmu yang dapat digunakan untuk membantu dalam menghitung fenomena yang berhubungan dengan penyelesaian numerik. Dalam memodelkan pembakaran serentak, segala hal yang berhubungan dengan pembakaran akan diperhitungkan agar mencapai hasil yang mendekati dengan yang sebenarnya. Dengan menggunakan CFD penulis ingin melihat fenomena pembakaran yang terjadi dalam ruang bakar. Sehingga penulis dapat menentukan komposisi bahan bakar yang efisien guna mengurangi konsumsi energi yang berlebihan dan tetap menjaga batas emisi yang dihasilkan selama proses.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan belakang diatas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. Bagaimana profil pembakaran dari variasi sekam pada *preheater SLC*?
- b. Bagaimana komposisi bahan bakar yang efisien pada *calciner* dalam memenuhi kebutuhan *clinker production*?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Unit pembakaran yang digunakan adalah bagian *separate line calciner* dari *preheater* dengan tipe *suspension preheater double string SLC* dan *ILC*
- b. Simulasi untuk mengetahui profil pembakaran yang terjadi dilakukan dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD)
- c. Bahan bakar yang digunakan pada *separate line calciner* adalah kombinasi antara sekam dan batu bara.
- d. Batu bara yang digunakan adalah jenis *sub-bituminous coal*

#### **1.4 Tujuan**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan diatas, maka tujuan dilaksanakannya tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. Mengetahui profil pembakaran yang terjadi pada *separate line calciner*.
- b. Mengetahui komposisi bahan bakar yang efisien pada *separate line calciner* dalam memenuhi kebutuhan *clinker production*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB II

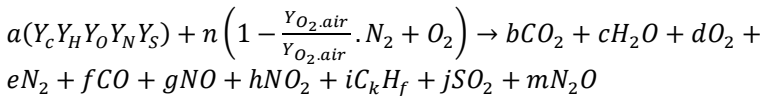
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Proses Pembakaran

Pembakaran adalah salah satu proses yang paling umum dalam menghasilkan *supply energy*. Secara umum, pembakaran adalah reaksi oksidasi secara cepat antara bahan bakar dan oksidator yang disertai produksi panas dan nyala api. Pelepasan panas ini ditandai dengan terbentuknya nyala api. Untuk memperoleh reaksi pembakaran dibutuhkan tiga hal penting yang biasa disebut segitiga api yakni, bahan bakar, panas, dan, udara. Bahan bakar (*fuel*) adalah bahan yang akan melepaskan panas saat reaksi oksidasi terjadi dan secara umum mengandung unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Serta oksidator adalah substansi yang mengandung oksigen (secara umum udara) yang bereaksi dengan bahan bakar.

Pembakaran sempurna akan terjadi ketika dalam reaksi oksidasi memiliki kandungan oksigen yang cukup, terkadang dilakukan penambahan udara berlebih (*excess air*) untuk memastikan pembakaran sempurna dapat terjadi. Hasil utama dari proses pembakaran adalah karbondioksida, uap air, dan panas. Sementara jika tidak terjadi pembakaran sempurna maka akan timbul karbonmonoksida, abu (*ash*), NO<sub>x</sub>, atau SO<sub>x</sub> bergantung jenis bahan bakar yang digunakan.

Secara umum proses pembakaran dapat ditulis



Pada proses pembakaran, bahan bakar dan *oxidizer* (biasanya udara) dicampur kemudian dibakar. Jika ditinjau dari mekanisme kontak antara *fuel* dan *oxidizer* maka proses pembakaran dapat dibagi menjadi 2 yaitu *premix* dan *non-premix combustion*.

*Premix combustion* adalah pembakaran bahan bakar dan *oxidizer* dicampur terlebih dahulu kemudian dibakar (dengan *ignition phenomena*) sedangkan *non-premix combustion* adalah proses pencampuran dan pembakaran bahan bakar dengan *oxidizer* terjadi secara simultan. Masing-masing metode ini juga dapat memiliki aliran yang berbeda <sup>[5]</sup>

**Tabel 2.1** Jenis proses pembakaran berdasarkan mekanisme kontak bahan bakar<sup>[5]</sup>

Mekanisme Kontak	Jenis Aliran	Contoh
<i>Premix</i>	Laminar	Api Bunsen
	Turbulen	Spark ignite gasoline engine
<i>Non-Premix</i>	Laminar	Pembakaran kayu atau lilin
	Turbulen	Pulverized coal combustion

## 2.2 Bahan Bakar

Setiap bahan bakar memiliki kualitas batu bara yang berbeda bergantung dengan kandungannya.

Setiap bahan bakar memiliki nilai pembakaran atau nilai kalor (*heating value*) yang menunjukkan jumlah energy yang dilepaskan ketika suatu bahan bakar dibakar secara sempurna dalam suatu proses aliran tunak (*steady*). Besarnya nilai kalor dari suatu bahan bakar sama dengan harga mutlak dari entalpi pembakaran bahan bakar.

$$\text{Nilai Kalor} = |\Delta H_c| \quad (2.1)$$

Terdapat dua jenis nilai kalor yaitu.

- High Heating Value* (HHV) yaitu nilai kalor atas. Nilai kalor atas ditentukan pada saat H<sub>2</sub>O, atau udara hasil pembakaran pada produk pembakaran berbentuk cairan
- Lower Heating Value* (LHV) yaitu nilai kalor bawah. Nilai kalor bawah ditentukan saat udara hasil pembakaran berbentuk gas

Pada analisis nilai bakar memiliki 2 basis analisis yaitu analisis proksimasi dan ultimasi. Kedua analisis ini menggunakan fraksi dalam komponen bahan bakar, contohnya nilai kebasahan dan abu. Pada analisis proksimasi bahan bakar menghasilkan fraksi massa dari karbon tetap (FC), bahan bakar yang dapat menguap (VM), kebasahan (M), kadar abu (A) dan nilai HHV serta kandungan sulfur (S). Analisis ini dilakukan dengan menimbang, memanaskan, dan membakar semua sampel kecil batu bara. Berikut adalah persamaan untuk memperoleh nilai kalor tinggi.

$$HHV = 33950C + 144200 \left( H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400S \quad (2.2)$$

Analisis Ultimasi didapatkan dari hasil uji laboratorium dengan mendapatkan fraksi massa karbon (C), hidrogen  $H_2$ , Oksigen ( $O_2$ ), sulfur (S), dan nitrogen ( $N_2$ ) dalam batubara. Analisis ultimasi dilakukan untuk menentukan kebutuhan udara pembakaran dan untuk mengukur sistem aliran dalam dapur pembakaran.

$$LHV = HHV - 2400 (M + 9H_2) \quad (2.3)$$

Dengan M adalah kandungan air (*moisture*) dalam bahan bakar. Pelaporan analisis bahan bakar padat mencantumkan metode atau *basis* yang digunakan dalam menganalisis komposisi bahan bakar. *Dry basis* biasanya digunakan dalam analisis batu bara untuk mengantisipasi perbedaan penyimpanan dan dampak dari cuaca terhadap bahan bakar.

Dalam menggunakan analisis bahan bakar perlu melihat basis yang digunakan dalam merubah basis begitu diterima menjadi basis kering menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$Y_{ar} = \frac{100}{100 - m_r} \quad (2.4)$$

Persamaan 2.4 juga dapat digunakan untuk merubah basis kering menjadi basis *dry ash free* dengan mengganti mol air menjadi mol abu.

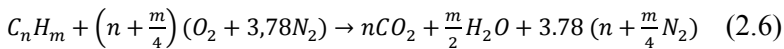
Secara teori jumlah oksigen yang diperlukan agar pembakaran sempurna tercapai dapat dihitung walaupun pembakaran sempurna dalam keadaan actual pembakaran tidak pernah ideal. Berdasarkan analisis bahan bakar dapat menentukan jumlah kebutuhan udara yang diperlukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$AFR = \frac{\rho_{air}}{\rho_{oksigen} \times \rho_{air}} \left( \frac{32}{12} \%C + \frac{16}{2} \%H - \%O + \%S + \frac{32}{14} \%N \right) \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}} \quad (2.5)$$

Untuk mencapai pembakaran ideal diperlukan suplai udara yang lebih banyak. Jumlah kelebihan udara tersebut dapat dihitung dengan dasar nilai rasio udara terhadap jumlah bahan bakar yang digunakan. Dalam keadaan pembakaran yang ideal jumlah udara dan bahan bakar sesuai dengan komposisi kesetimbangan kimia.

### 2.3 Stokimetri Pembakaran

Reaksi oksidasi dari hidrokarbon sederhana akan menghasilkan karbon dioksida ( $CO_2$ ) dan uap air ( $H_2O$ ). Udara yang digunakan dalam pembakaran mengandung oksigen dan nitrogen yang lebih dominan dibanding dengan kandungan udara yang lain. Sehingga reaksi kimia pembakaran hidrokarbon sederhana ( $C_nH_m$ ) menjadi.



Dalam proses pembakaran hal yang harus diperhatikan adalah bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Perbandingan antara campuran bahan bakar dan udara berperan penting dalam terbentuknya pembakaran sempurna. Untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara dapat menggunakan AFR (*air to fuel ratio*).

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (2.7)$$

Pembakaran yang terjadi secara actual dan secara stokiometri akan berbeda. Sehingga dapat menentukan rasio udara-bahan bakar ekivalen. Yakni perbandingan rasio udara-bahan bakar actual dengan stokiometri.

$$\Phi = \frac{AFR_f}{AFR_a} \quad (2.8)$$

Nilai  $\Phi$  (phi) menunjukkan kekayaan campuran bahan bakar dengan udara dalam pembakaran.

- $\Phi > 1$  terdapat kelebihan bahan bakar dalam campurannya sehingga disebut campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- $\Phi < 1$  campuran ini disebut campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)
- $\Phi = 1$  merupakan campuran ideal stokiometri atau dapat disebut terjadi pembakaran sempurna.

Dalam reaksi stokiometri penentuan perbandingan udara-bahan bakar ditentukan dengan jumlah fraksi mol atau fraksi massa dari komponen hidrokarbon. Fraksi mol sebuah komponen pada campuran tertentu ditentukan dari perbandingan mol komponen tersebut dengan mol campuran.

$$X_i = \frac{mol_i}{\sum_{i=1}^n mol_i} \quad (2.9)$$

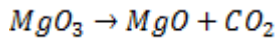
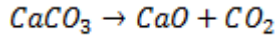
Sehingga total fraksi mol suatu campuran akan bernilai satu.

## 2.4 Suspension Preheater

Suspension Preheater merupakan suatu susunan empat *stage cyclone* dan satu buah *calsiner* yang tersusun menjadi satu *string*. Fungsi pokok dari *preheater* adalah pemanasan awal produk hasil *raw mill* dan tempat terjadinya proses penghilangan kadar air bebas hingga kalsinasi. Sistem *preheater* dipasang di dalam menara yang terbuat dari baja atau beton dengan ketinggian sekitar 60-120 m di atas *inlet kiln*. Pemanasan yang terjadi pada

*preheater* melalui beberapa *stage cyclone* dengan menggunakan gas panas hasil pembakaran dari *kiln*.

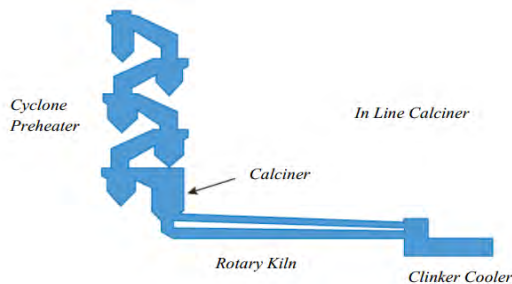
Dalam *preheater* ini terjadi proses kalsinasi, penguraian karbonat menjadi oksida CaO dan MgO serta CO<sub>2</sub>, reaksi kimia ditunjukkan sebagai berikut.



Proses kalsinasi ini terjadi pada kalsiner, ada dua sistem kalsiner yaitu.

a. *In Line Calciner* (ILC)

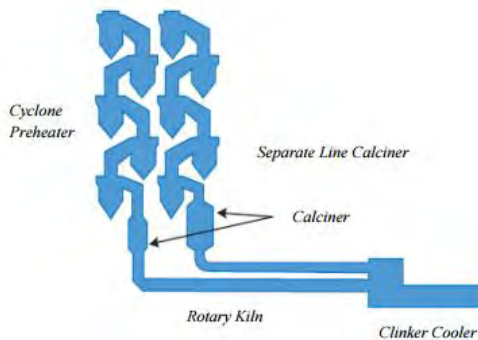
Aliran udara pembakaran di kalsiner disuplai dari udara tersier dan udara dari kiln.



**Gambar 2.1** *In Line Calciner*

b. *Separate Line Calciner* (SLC)

Udara panas tersier dari cooler masuk ke kalsiner melalui central inlet di bagian dasar dan gas buang keluar kalsiner melalui sisi outlet di bagian atas.



**Gambar 2.2** *Separate Line Calciner*

Tipe *Suspension Preheater* yang digunakan pada Pabrik Tuban I adalah tipe *double string*. Pada tiap *string* terdiri dari empat *stage* yang dilengkapi dengan *In-Line* dan *Separate Calciner*. Pada *cyclone* paling atas atau *stage* pertama terdapat dua *cyclone* (*double cyclone*) yang dipasang secara paralel. Tujuan memasang *double cyclone* pada *stage* pertama adalah untuk meningkatkan efisiensi pemisahan antara gas panas dan material di dalam *preheater*. *Stage* pertama sampai ketiga berfungsi sebagai pemanas awal umpan *kiln*, sedangkan *stage* keempat dipakai sebagai pemisah produk keluar dari *flash calciner* yang telah ter-*calcinasi*.

Perpindahan panas di dalam *cyclone*, terbesar terjadi di dalam *riser duct* masing-masing *cyclone*. Proses perpindahan panas antara gas panas dan material dingin berjalan secara *cocurrent* atau searah. Pada *down pipe* masing-masing *cyclone* dipasang *tipping valve*, sehingga ada sedikit material untuk melindungi agar tidak terjadi aliran gas lewat *down pipe*. Dinding bagian dalam *cyclone* dan *calciner* dilapisi oleh *refractory brick* dan *castable* yang merupakan bahan atau material yang tahan terhadap panas dan aus. Berikut adalah suhu material dan suhu gas dalam *preheater*.

**Tabel 3.1** *Stage Pemanasan Preheater*

<i>Stage</i>	Suhu Material	Suhu Gas
I	310 – 330 °C	355 – 365 °C
II	500 – 550 °C	540 – 560 °C
III	650 – 690 °C	690 – 710 °C
IV	780 – 800 °C	820 – 840 °C
<i>Calcliner</i>	900 – 930 °C	830 – 870 °C

(Sumber : *Central Control Room* Tuban I,II 2013)

## 2.5 Computational Fluid Dynamics

*Computaional Fluid Dynamic* (CFD) adalah ilmu yang digunakan untuk memprediksi serta menghitung aliran fluida, transfer panas dan massa, dan fenomena lain yang berhubungan dengan penyelesaian numerik dari beberapa persamaan matematika. Persamaan matematika yang digunakan dalam CFD adalah persamaan konservasi massa, konservasi energi, konservasi momentum, dan beberapa persamaan lainnya. CFD menggunakan *finite element*. Masing-masing geometri dibagi-bagi menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sebagai *control volume*. Perhitungan semua persamaan matematis dilakukan untuk setiap kontrol volume.

Dalam melakukan simulasi dengan menggunakan CFD, terdapat tiga tahapan yang harus dilaksanakan:

### a. Pre-Processing

Tahap pre-processing merupakan tahap dimana semua data digunakan sebagai input dari pendefinisian domain serta pendefinisian *boundary condition*. Dilakukan pembuatan geometri dari benda yang akan disimulasikan. Pembuatan geometri dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai software. Setelah geometri selesai dibuat, selanjutnya dilakukan proses meshing (membagi geometri menjadi *control volume* yang kecil). Semakin halus proses meshing, maka hasilnya akan semakin baik, namun membutuhkan proses komputasi yang semakin berat.



b. Processing

Pada tahap ini dilakukan perhitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara iterasi. Iterasi dilakukan sampai diperoleh nilai *error* terkecil dan didapatkan hasil yang konvergen.

c. Post Processing

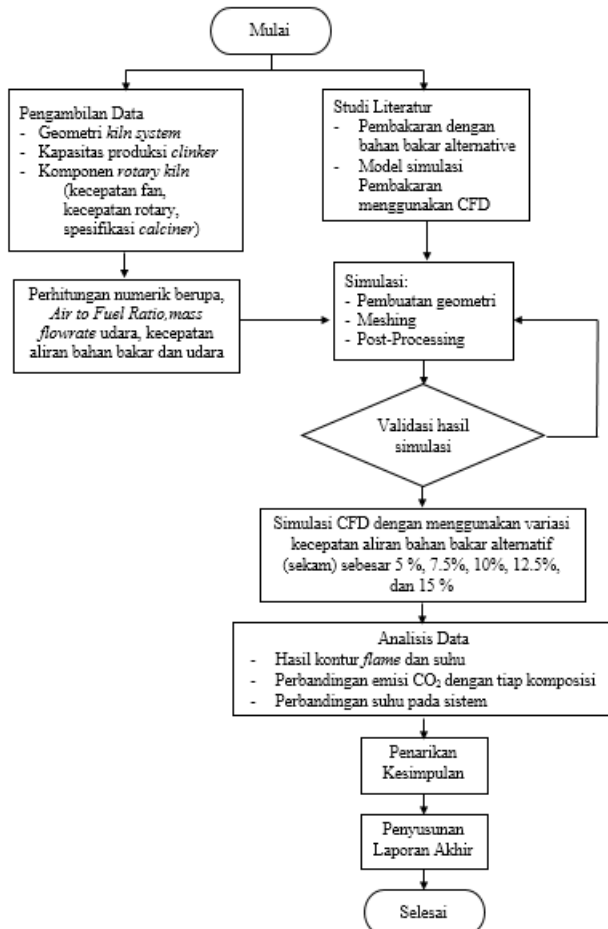
Tahap terakhir adalah tahap post-processing dimana hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk gambar, grafik, ataupun animasi dengan pola warna tertentu.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 merupakan diagram alir yang menentukan tahapan –tahapan dalam pelaksanaan tugas akhir ini



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

Pelaksanaan tugas akhir ini diawali dengan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk meningkatkan pemahaman peneliti terhadap topik penelitian yang diambil. Literatur yang digunakan oleh peneliti terdiri dari jurnal, laporan, buku, *website* dan berbagai sumber lain yang mendukung. Studi literatur tidak hanya dilakukan pada bagian awal pengerjaan tugas akhir, namun selama pelaksanaan penelitian akan dilakukan studi literatur untuk menunjang proses pengerjaan tugas akhir yang sedang berlangsung. Studi literatur yang dilaksanakan meliputi, pemahaman proses pembakaran yang terjadi pada proses pembuatan *clinker*, memahami pembakaran *cofiring* (serentak), dan permodelan pembakaran dengan menggunakan simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD).

Untuk mengetahui hasil pembakaran serentak yang akan disimulasikan, maka dilakukan perhitungan kebutuhan udara pembakaran melalui analisis ultimasi. Dan komposisi bahan bakar yang dibutuhkan. Selanjutnya dilakukan proses untuk menentukan *boundary condition* yang akan digunakan dalam simulasi berupa perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya.

Selanjutnya adalah simulasi yang meliputi pembuatan geometri, *meshing*, *pre-processing*, *processing* dan *post-processing*. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD). Data-data yang diperoleh dari simulasi meliputi temperatur, kontur *flame*, emisi CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan NO<sub>x</sub>. Dalam melakukan pengambilan data ini, peneliti menggunakan enam macam variasi campuran bahan bakar alternative sekan (5%; 7,5%; 10%; 12,5%; 15% ). Data hasil simulasi ini kemudian dilakukan analisis.

### 3.2 Perhitungan Numerik

Sebelum melakukan simulasi CFD dilakukan perhitungan numerik untuk menentukan nilai *boundary species* dan *boundary condition* pada simulasi CFD. Perhitungan yang akan dilakukan adalah perhitungan *mol fraction* dari tiap jenis bahan bakar, *mass flow rate udara*, kecepatan aliran bahan bakar, dan kecepatan

aliran udara, serta perhitungan variasi kecepatan aliran bahan bakar.

### 3.2.1 Perhitungan *Mol Fraction* Bahan bakar

Untuk menghitung *mol fraction* bahan bakar dalam menentukan *boundary species* dibutuhkan komposisi dari bahan bakar yang digunakan. Bahan bakar yang akan digunakan secara serentak dalam kasus ini adalah batu bara sub bituminous dan sekam padi. Berikut analisis proksimasi dan ultimasi bahan bakar yang diambil dari Laboratorium Jaminan Mutu PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.

**Tabel 3.1** Analisis Ultimasi dan Proksimasi (Ar) Batu Bara dan Sekam Padi.

Analisis Proksimasi (%)	Parameter	Batubara	Sekam Padi
	TM	18.93	13.26
	A	9.01	16.66
	VM	37.48	51.66
	FC	34.58	18.42
LHV / NHV (kJ/kg)		18484	12583
HHV/ GHV (kJ/kg)		19679	13873
Analisis Ultimasi (%)	C	53.31	32.87
	H	3.33	4.39
	N	0.95	0.54
	O	14.2	32.2
	S	0.27	0.08

Analisis Ultimasi dan Proksimasi yang didapatkan adalah dalam *as received basis* sedangkan dalam simulasi menggunakan *dry ash free basis*. Untuk mengubah menjadi *dry ash free basis* maka dilakukan perhitungan sehingga analisis ultimasi menjadi.

**Tabel 3.2** Analisis Ultimasi dan Proksimasi (DAF) Batu Bara dan Sekam Padi.

Analisis Proksimasi (%)	Parameter	Batubara	Sekam Padi
	TM	-	-
	A	-	-
	VM	52.01	73.72
	FC	47.99	26.28
LHV / NHV (kJ/kg)		25650.85	17955.19
HHV/ GHV (kJ/kg)		27309.19	19795.95
Analisis Ultimasi (%)	C	73.98	46.90
	H	4.62	6.26
	N	1.32	0.77
	O	19.71	45.95
	S	0.37	0.11

Sehingga mol fraction untuk *boundary species* sebagai berikut.

**Tabel 3.3** Mol Fraction Bahan Bakar

Komposisi	mol fraction	
	Batubara	Sekam Padi
C	0.509	0.298
H	0.381	0.478
N	0.008	0.004
O	0.102	0.219
S	0.001	0.000

### 3.2.2 Perhitungan Air to Fuel Ratio

Perhitungan Air to fuel ratio dimaksudkan untuk memperoleh rasio udara yang dapat menghasilkan pembakaran sempurna. Menggunakan Persamaan 2.5 maka dapat diketahui AFR dari *mass flow rate* batu bara, berdasarkan *mass flowrate*

batu bara 2.05 kg/s dan mass flow rate sekam 1.28 kg/s yang sama dengan mass flowrate batubara sebesar 5.03 kg/s dalam fraksi bebas abu kering, akan didapatkan kebutuhan udara pembakaran sebesar 9.41 kg udara/ kg batubara. Mass flow rate bahan bakar yang tertulis adalah kebutuhan keadaan sebenarnya dalam memenuhi produksi clinker sebanyak 153 kg/s.

### 3.2.3 Perhitungan Mass Flow Rate Udara

Untuk mendapatkan mass flow rate udara, diperlukan AFR yang telah dilakukan sebelumnya. Sehingga mass flow rate udara yang dibutuhkan adalah.

$$\begin{aligned}\dot{m}_{udara} &= \dot{m}_{bahanbakar} \times AFR \\ \dot{m}_{udara} &= 5.03 \times 9.41 \\ \dot{m}_{udara} &= 47.35 \frac{kg}{s}\end{aligned}\quad (3.1)$$

### 3.2.4 Perhitungan Kecepatan Aliran Udara dan Bahan Bakar

Setelah perhitungan mass flowrate udara dilakukan perhitungan kecepatan aliran udara yang rumusnya juga sama dengan kecepatan bahan bakar.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \times A} \quad (3.2)$$

Sehingga kecepatan aliran udara pada *calciner* sebagai berikut.

$$\begin{aligned}v_{udara} &= \frac{47.35}{0.463 \times 6.1557} \\ v_{udara} &= 16.62 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Hal yang sama dilakukan pada bahan bakar yang masuk pada masing-masing inlet. Menggunakan Persamaan 3.2 akan didapatkan kecepatan batu bara sebesar 0.03 m/s dan sekam sebesar 0.01 m/s

### 3.2.5 Perhitungan Kecepatan Variasi Aliran Bahan Bakar

Variasi dilakukan pada komposisi sekam dimana terdapat lima variasi yakni dari 5% hingga 15%. Persamaan yang digunakan dalam menentukan variasi *mass flow rate* dari tiap variasi adalah sebagai berikut.

$$\dot{m} = \frac{\text{variasi}(\%) \times Q}{HHV_{\text{bahanbakar}}}$$

Nilai Q didapatkan dari perhitungan hasil data pabrik. Setelah dilakukan perhitungan variasi *mass flow rate* dilanjutkan dengan merubah menjadi kecepatan aliran bahan bakar sesuai dengan persamaan 3.2. sehingga akan didapat hasil sesuai Tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Kecepatan Aliran Bahan Bakar Hasil Variasi Komposisi Sekam

Variasi Sekam (%)	$\dot{m}$ (kg/s)		v (m/s)	
	Batu Bara	Sekam Padi	Batu Bara	Sekam Padi
5	5	2.390	0.347	0.034
7.5	7.5	2.327	0.521	0.033
10	10	2.264	0.694	0.032
12.5	12.5	2.201	0.868	0.031
15	15	2.139	1.041	0.030

### 3.3 Desain *Separate Line Calciner*

Spesifikasi *calciner* yang digunakan dalam simulasi kali ini bersumber langsung dari desain *calciner* Pabrik Tuban I. Berikut merupakan spesifikasi geometri dari *calciner*.

**Tabel 3.5** Spesifikasi Geometri *Calciner*

Diameter <i>clinker inlet</i>	4.75 m
Diameter inlet batubara	30 cm
Panjang inlet sekam	60 cm
Lebar inlet sekam	50 cm
Diameter inlet gas panas	2.8 m
Diameter dinding	4.78 m
Jumlah inlet batu bara	2
Jumlah inlet sekam	1



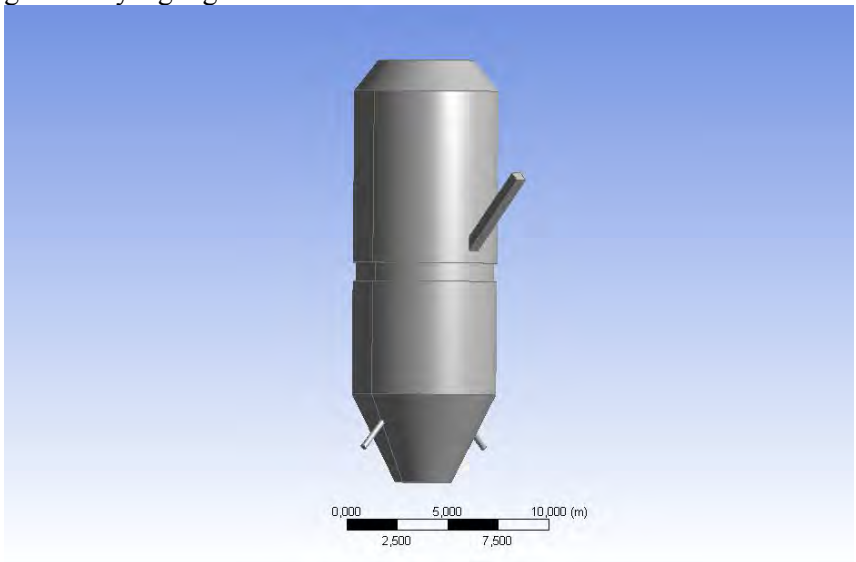
Setelah dilakukan Gambar dengan menggunakan software Solidworks dapat ditunjukkan desain *calciner* pada Gambar 3.2

### 3.4 Simulasi CFD

#### 3.4.1 Pre Processing

##### a. Pembuatan Geometri

Simulasi CFD diawali dengan pembuatan geometri *calciner* dengan menggunakan Solidworks. Berikut adalah geometri yang digunakan dalam simulasi.



**Gambar 3**Error! No text of specified style in document..2  
Geometri SL-*Calciner*

##### b. Meshing

Meshing merupakan pembagian geometri menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Dimana bagian-bagian yang lebih kecil tersebut akan disebut *control volume* yang akan dihitung dengan Persamaan yang sesuai dengan kondisi aliran fluida sebenarnya. Semakin kecil *meshing* yang dilakukan, maka akan semakin detail perhitungan yang didapat. Berikut adalah ukuran *meshing* yang digunakan dalam simulasi ini.

Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
[-] Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Proximity Accuracy	0,5
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (3,6257e-003 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (3,6257e-003 m)

Gambar 3.3 Set up Meshing

Hasil geometri yang telah melalui proses *meshing* ditunjukkan oleh Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Hasil Meshing Geometri Calciner

### 3.4.2 Boundary Contion dan Processing

Model yang digunakan dalam simulasi ini adalah dalam kondisi transient dan berdasarkan *pressure based-segregated solver* yang mana penyelesaian perhitungan momentum, spesiec, energy, dan turbulensi dilakukan secara berurutan. Simulasi yang dilakukan adalah proses pembakaran serentak (*cofiring*) dengan bahan bakar batu bara dan sekam padi pada sebuah *separated line calciner*. Pembakaran menggunakan *non-premixed combustion* karena kombinasi bahan bakar yang digunakan. Serta tidak adanya pembakaran sebelum bahan bakar memasuki ruang bakar. Viskositas yang digunakan adalah k-epsilon standar karena sudah dapat memodelkan aliran turbulen pada pembakaran serentak. Model radiasi yang digunakan adalah model Discrete Ordinates (DO) untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat<sup>[5]</sup> Model yang digunakan dalam simulasi dijelaskan lebih lanjut dalam Tabel 3.6.

**Tabel 3.6** Model Simulasi pada ANSYS Fluent 14.

Model Persamaan CFD	Model yang digunakan
Viskositas	Standard k-epsilon, Standard Wall treatment
Radiasi	Discrete Ordinates (DO)
Species Model	Non-Premixed Combustion

Tahapan selanjutnya akan mendefinikan kondisi batas pada domain yang telah dibuat. Setelah kondisi batas didefinisikan, akan dimasukkan nilai parameter kondisi simulasi sesuai dengan keadaan sebenarnya. Kondisi batas atau *boundary condition* pada simulasi ini ditampilkan dalam Tabel 3.7.

**Tabel 3.7** Kondisi Batas Simulasi

No	Nama Kondisi Batas	Tipe Kondisi Batas
1	Coal Inlet	Velocity inlet, Kecepatan aliran batubara
2	Rice Husk Inlet	Velocity inlet, Kecepatan aliran sekam padi
3	Gas Inlet	Velocity inlet, Kecepatan aliran gas panas
4	<i>Clinker</i> Inlet	Velocity inlet, Kecepatan aliran <i>clinker</i>
5	Outlet	Pressure outlet

Setelah pendefinisian kondisi batas, dilanjutkan penentuan model solver yang digunakan. Model solusi yang digunakan dijelaskan pada table 3.8

**Tabel 3.8** Metode Solusi pada Simulasi Pembakaran

No	Metode Solusi	Metode
1	Solver	Pressure Based Segregated
2	Scheme	SIMPLE
3	Gradient	Least Square Based
4	Tekanan	PRESTO!
5	Momentum	Second Order Upwind
6	Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
7	Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind
8	Species	Second Order Upwind
9	Energy	Second Order Upwind
10	Discrete Ordinates	Second Order Upwind

Selanjutnya mengatur nilai konvergensi kriteria dengan mengaur nilai RMS *residual error*. Nilai RMS yang digunakan sebesar  $10^5$  untuk energy dan radiasi. Jika proses iterasi tidak mencapai kondisi konvergen maka dapat diatur parameter solution yang lain. Hasil iterasi yang konvergen dapat dilihat pada Gambar 3.5.

Pada simulasi ini menggunakan transient time dengan *time step* sebesar 0.5 detik dan jumlah *time step* 4 serta dilakukan iterasi tiap 200 *time step*.



### 3.4.3 Post Processing

Post processing dalam CFD adalah pengambilan data yang diperlukan seperti plot kontur, plot grafik, dan *streamline* yang dihasilkan simulasi. Dalam tugas akhir ini, data yang diperlukan adalah plot kontur temperature dari *calcinier*, temperature outlet, fraksi massa pollutant NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, dan CO.

### 3.5 Validasi Hasil

Validasi hasil dilakukan dengan cara membandingkan temperature outlet *calcinier* hasil simulasi dengan temperature actual pada pabrik. Perbandingan dilakukan dengan melihat besar *error* antara hasil simulasi dan keadaan sebenarnya. Jika nilai *error* lebih dari 10% maka simulasi dianggap tidak cukup merepresentasikan keadaan sebenarnya.

### 3.6 Variasi Komposisi Sekam

Variasi komposisi sekam dilakukan sebanyak 5 kali yakni dari 5%, 7.5%, 10%, 12.5% dan 15%. Variasi sekam pada simulasi dimodelkan dalam inputan *boundary condition* dalam kecepatan aliran masuk bahan bakar pada ruang bakar. Variasi ini dihitung melalui kebutuhan kalor yang harus disuplai oleh bahan bakar untuk memenuhi produksi *clinker*. Hasil dari variasi ini akan membantu analisis yang terjadi dalam pembakaran dalam *calcinier* dengan melihat data temperature, fraksi massa NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, dan CO.

## **BAB IV**

### **ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Validasi Hasil Simulasi**

Validasi data merupakan salah satu proses penting dalam suatu penelitian terutama untuk simulasi. Melalui proses validasi, dapat diketahui kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya. Dalam tugas akhir ini dilakukan dengan membandingkan antara parameter pada simulasi dan data Pabrik Tuban 1 PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Parameter yang akan dibandingkan adalah temperature keluaran *calciner SLC*. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa temperature outlet SLC sebesar 992.16 K sedangkan pada data asli pabrik sebesar 1122.33 K. Dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai error. Sehingga didapatkan nilai *error* sebesar 11.59%. Dimana nilai ini masih dinilai terlalu besar karena masih lebih dari batas minimal nilai *error* yakni sebesar 10%. Dari nilai yang diperoleh menunjukkan bahwa permodelan yang digunakan dan dipilih sebagai model simulasi untuk memodelkan pembakaran *co firing* dalam proses kalsinasi di *Calciner SLC* belum cukup merepresentasikan keadaan sebenarnya sehingga dapat dikatakan belum cukup valid. Namun dengan perbedaan batas nilai error yang sedikit maka model ini cukup dapat merepresentasikan simulasi pembakaran *cofiring* dalam tugas akhir ini.

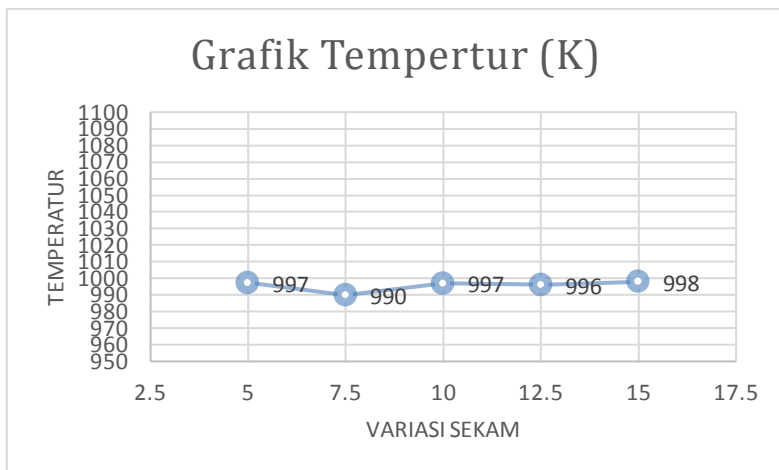
#### **4.2 Efek Variasi Komposisi Sekam Terhadap Temperatur Pembakaran**

Berdasarkan data yang dibutuhkan pabrik dalam memproduksi clinker sebanyak 153 kg/s, maka diperoleh mass flow rate bahan bakar sekam, batu bara, dan kebutuhan udara pembakaran. Hasil aliran massa lalu diubah menjadi kecepatan aliran bahan bakar dan udara. Nilai kecepatan aliran bahan bakar udara ini akan menjadi input dalam *preprocessing* simulasi. Pada *postprocessing* akan didapatkan hasil simulasi CFD berupa nilai temperature outlet *calciner*, polutan NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, dan CO.

**Tabel 4.1** Hasil Variasi Sekam terhadap Suhu Pembakaran

Variasi Sekam (%)	T (K)
5	997.24
7.5	989.91
10	996.91
12.5	996.10
15	997.91

Pada simulasi CFD telah disimulasikan pembakaran serentak dalam *calciner* dengan variasi bahan bakar alternative yaitu sekam padi. Variasi ditunjukkan dengan komposisi sekam yang berbeda yakni 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%. Gambar 4.1 menunjukkan grafik suhu terhadap variasi komposisi sekam.

**Gambar 4.1** Grafik Temperatur Terhadap Variasi Komposisi Sekam

Dari hasil data yang diperoleh terlihat grafik temperature pada variasi sekan 7.5% menurun namun tidak terjadi kenaikan maupun penurunan suhu yang signifikan akibat pengaruh variasi komposisi sekam. Nilai ini dipengaruhi oleh *volatile matter* dari bahan bakar yang digunakan.



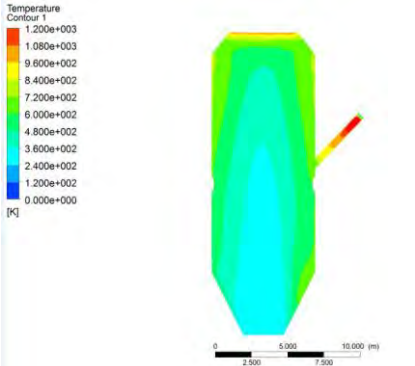
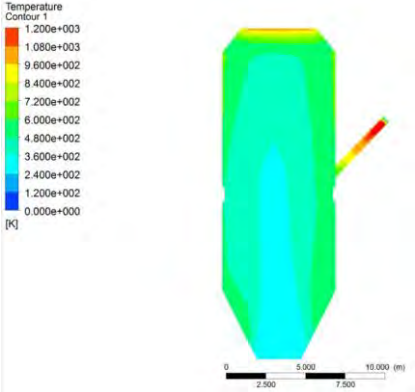
#### 4.2.1 Kontur Temperatur Hasil Simulasi Variasi dari Komposisi Sekam

Pada simulasi CFD telah disimulasikan pembakaran serentak dalam *calciner* dengan variasi bahan bakar alternative yaitu sekam padi. Variasi ditunjukkan dengan komposisi sekam yang berbeda yakni 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%. Kontur temperature hasil simulasi pada *calciner* diGambarkan pada koordinat YZ yang mengGambarkan distribusi temperature dari *inlet* dari batubara dan XY yang mengGambarkan *inlet* dari sekam.

Pada tampilan kontur temperatur, api menyebar paling tinggi pada variasi 7.5%, dengan panjang api mendekati sisi outlet *calciner*. Dimana saat variasi ini memiliki temperature outlet sebesar 990 K sedangkan nyala api paling besar terjadi pada variasi 15% dimana distribusi temperature paling menyebar. Pada variasi 5% nilai temperatur cukup rendah dibandingkan temperature outlet variasi yang lain. Peningkatan laju aliran massa bahan bakar mengakibatkan kenaikan nilai volume api, karena nilai bahan bakar yang dibakar akan lebih banyak. Pada proses pembakaran biasa, penurunan temperature biasanya terjadi saat mendekati outlet ruang bakar namun hal ini tidak terjadi pada simulasi pembakaran *calciner* ini. Dikarenakan pada outlet *calciner* menjadi inlet *clinker* yang akan melalui proses kalsinasi pada *calciner* dan *clinker* yang masuk ke dalam *calciner* membawa temperature hasil keluaran pada cyclone 4. Variasi sekam terlihat tidak berpengaruh dengan kontur maupun temperature total dalam *calciner*. Sekam memiliki volatile matter yang tinggi namun memiliki nilai kalor yang lebih rendah disbanding batubara. Nilai kalor yang tinggi akan lebih berpengaruh dalam penentuan temperature total pembakaran. Berikut adalah tabel kontur distribusi temperature terhadap variasi sekam.

**Tabel 4.2** Kontur Temperatur terhadap Variasi Sekam bidang XY

Variasi Sekam (%)	Kontur Temperatur (XY)
5	<div><div><div>Temperature Contour 2</div><div><div>1.200e+003</div><div>1.080e+003</div><div>9.600e+002</div><div>8.400e+002</div><div>7.200e+002</div><div>6.000e+002</div><div>4.800e+002</div><div>3.600e+002</div><div>2.400e+002</div><div>1.200e+002</div><div>0.000e+000</div></div><div>[K]</div></div><div></div></div>
7.5	<div><div><div>Temperature Contour 1</div><div><div>1.200e+003</div><div>1.080e+003</div><div>9.600e+002</div><div>8.400e+002</div><div>7.200e+002</div><div>6.000e+002</div><div>4.800e+002</div><div>3.600e+002</div><div>2.400e+002</div><div>1.200e+002</div><div>0.000e+000</div></div><div>[K]</div></div><div></div></div>
10	<div><div><div>Temperature Contour 1</div><div><div>1.200e+003</div><div>1.080e+003</div><div>9.600e+002</div><div>8.400e+002</div><div>7.200e+002</div><div>6.000e+002</div><div>4.800e+002</div><div>3.600e+002</div><div>2.400e+002</div><div>1.200e+002</div><div>0.000e+000</div></div><div>[K]</div></div><div></div></div>

Lanjutan (Tabel 4.2)	
12.5	
15	

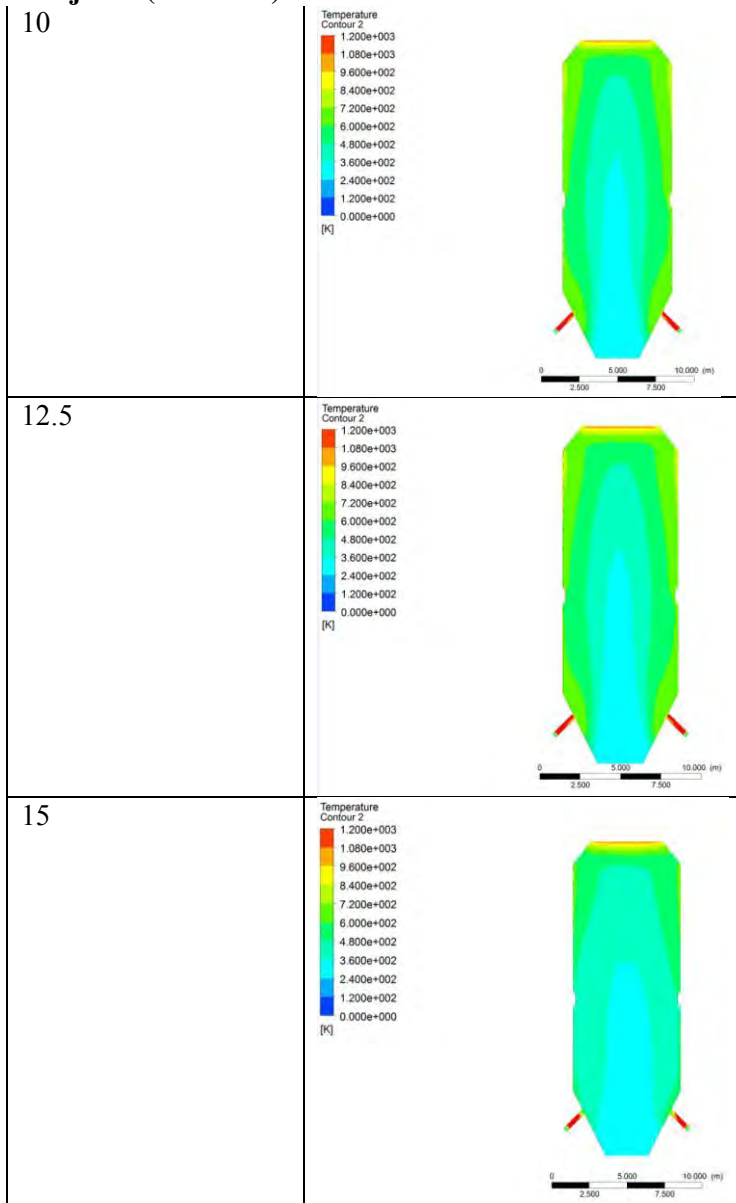
Distribusi temperature dapat dilihat juga pada bidang YZ dimana bidang tersebut terdapat *inlet* batu bara. Nilai *inlet* batu bara terhadap variasi sekam akan menurun seiring dengan naiknya variasi sekam yang digunakan dalam penelitian ini. Pada hasil kontur distribusi temperature pada bidang YZ, pada variasi 15 % distribusi temperature rendah lebih sering terjadi. Hal yang sama juga terjadi pada distribusi pada bidang XY. Pada variasi

15% penggunaan sekam paling banyak sehingga panas yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan variasi yan lain. Tabel 4.3 menunjukkan perbandingan distribusi temperature di bidang YZ

**Tabel 4.3** Kontur Temperatur terhadap Variasi Sekam bidang YZ

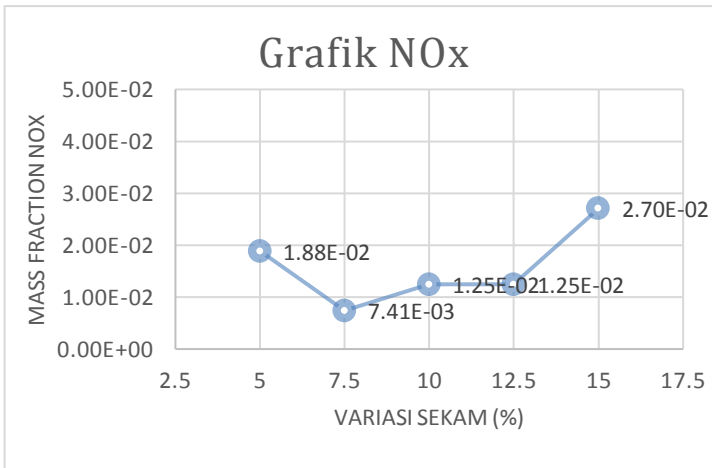
Variasi Sekam (%)	Kontur Temperatur
5	<div><div><div>Temperature Contour 1</div><div><div>1.200e+003</div><div>1.080e+003</div><div>9.600e+002</div><div>8.400e+002</div><div>7.200e+002</div><div>6.000e+002</div><div>4.800e+002</div><div>3.600e+002</div><div>2.400e+002</div><div>1.200e+002</div><div>0.000e+000</div></div><div>[K]</div></div><div></div></div>
7.5	<div><div><div>Temperature Contour 2</div><div><div>1.200e+003</div><div>1.080e+003</div><div>9.600e+002</div><div>8.400e+002</div><div>7.200e+002</div><div>6.000e+002</div><div>4.800e+002</div><div>3.600e+002</div><div>2.400e+002</div><div>1.200e+002</div><div>0.000e+000</div></div><div>[K]</div></div><div></div></div>

## Lanjutan (Tabel 4.3)



#### 4.3 Efek Variasi Komposisi Sekam Terhadap Pollutan

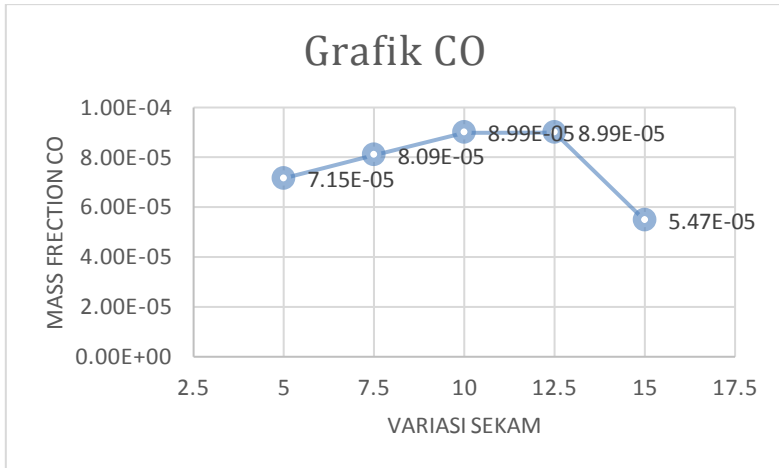
Penggunaan sekam sebagai bahan bakar alternative dalam pembakaran dapat mengurangi nilai emisi yang dihasilkan selama proses pembakaran. Emisi hasil pembakaran yang umum adalah CO, CO<sub>2</sub>, dan NO<sub>x</sub>. Emisi hidrokarbon yang terjadi akibat tidak bereaksinya hidrokarbon dengan oksigen dalam udara pembakaran. Sehingga hidrokarbon tersebut menjadi residu atau zat sisa yang terbawa pada gas buang hasil pembakaran. Gambar 4.7 menunjukkan dampak variasi sekam pada polutan NO<sub>x</sub> yang terjadi. Secara teoritis nilai pollutan NO<sub>x</sub> akan menurun seiring dengan meningkatnya penggunaan sekam, sesuai penelitian yang dilakukan oleh Dai <sup>[4]</sup>. Namun dalam penelitian tugas akhir ini, penggunaan sekam meningkatkan produksi pollutan NO<sub>x</sub>. Jika dibandingkan dengan Gambar 4.6 terlihat hubungan antara temperatur dan NO<sub>x</sub>. Dimana nilai konsentrasi NO<sub>x</sub> akan menyesuaikan dengan temperatur pembakaran. Dan akan berkebalikan dengan pembentukan emisi karbon, khususnya karbon monooksida.



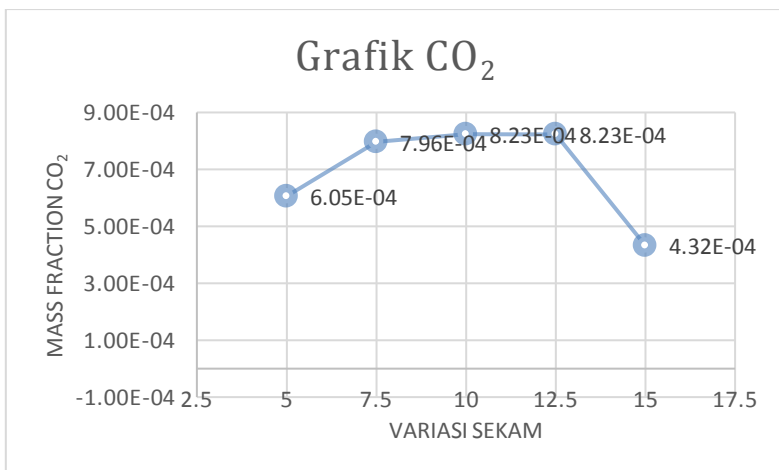
**Gambar 4.7** Grafik Pollutan NO<sub>x</sub> terhadap Variasi Sekam

Selain pollutan NOx hasil pembakaran juga menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> dan CO. CO adalah hasil pembakaran tidak sempurna dimana gas ini sangat berbahaya karena tidak berwarna dan berbau. CO terbentuk karena saat pembakaran terjadi komposisi bahan bakar lebih banyak oksidator. Pada Gambar 4.8 dan 4.9 adalah hasil grafik yang menunjukkan dampak kenaikan penggunaan sekam sebagai bahan bakar tambahan dalam pembakaran pada calciner. Dari prosentasi CO yang tertera menunjukkan terjadinya pembakaran tidak sempurna. Sesuai dengan reaksi stokiometri pembakaran dimana pembakaran dikatakan sempurna saat hasil pembakaran adalah panas dan karbondioksida tanpa ada residu lain. Pada hasil simulasi yang dilakukan, pollutan CO yang muncul menunjukkan bahwa pembakaran tidak terjadi secara sempurna. Terlihat bahwa grafik bahwa fraksi massa emisi CO naik pada variasi 5%, 7.5%, 10%, dan 12.5%, namun kenaikan fraksi massa tersebut tidak terlalu signifikan dan tetap dalam ambang batas emisi yang diperbolehkan. Pada variasi 15% penggunaan sekam terjadi penurunan fraksi massa CO menjadi  $5.47 \times 10^{-5}$ , dimana kadar CO yang terhitung paling rendah dibanding hasil variasi penggunaan sekam yang lain. Sesuai hubungan kadar emisi CO dengan stokiometri pembakaran dimana semakin kecil nilai CO yang dihasilkan maka semakin sempurna pembakaran yang berlangsung. Sehingga dapat dikatakan dalam variasi 15% pembakaran yang terjadi lebih sempurna dibandingkan dengan variasi penggunaan sekam yang lain.

Berdasarkan Gambar 4.9 dan 4.8 didapat bahwa fraksi massa CO dan CO<sub>2</sub> cenderung meningkat namun tidak terlalu signifikan, dan turun drastis pada variasi sekam 15 %. Emisi karbon monoksida merupakan hasil gas pembakaran yang tidak sempurna dimana jumlah bahan bakar tidak seimbang dengan oksidator. Dari Gambar 4.8 dapat dilihat fraksi massa CO paling sedikit pada variasi 15% yang berarti dalam pembakaran di variasi tersebut lebih dominan terjadi pembakaran sempurna.



**Grafik 4.8** Grafik Perbandingan Emisi CO Dengan Variasi Sekam



**Grafik 4.9** Grafik perbandingan emisi CO<sub>2</sub> dengan variasi sekam



Grafik 4.9 menunjukkan hasil emisi karbondioksida yang dihasilkan dari variasi penggunaan bahan bakar sekam sebagai bahan bakar pengganti batu bara. Karbon dioksida adalah hasil dari pembakaran. Sesuai dengan stokiometri pembakaran sempurna dimana pembakaran dikatakan sempurna apabila hasil dari proses pembakaran adalah panas dan karbon dioksida murni tanpa ada residu yang lain. Pada penggunaan variasi 15% *mass fraction* karbondioksida lebih kecil dibandingkan penggunaan variasi yang lain. Hal ini mengindikasikan efisiensi pembakaran lebih kecil dibanding penggunaan variasi lain. Namun dalam penelitian yang dilakukan pada calciner, diharapkan hasil pembakaran memiliki polutan yang paling minimal agar tidak mengganggu proses pembakaran dan menyebabkan sistem tidak bekerja dengan baik. Sehingga pada variasi 15% diambil sebagai komposisi pembakaran paling baik.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Profil pembakaran *co firing* pada SL-*calciner* memiliki distribusi temperature yang merata dalam ruang bakar. Temperature total pada pembakaran *co firing* dalam *calciner* ini tidak hanya bergantung dengan nilai bahan bakar yang digunakan namun juga terdapat temperature *clinker* dari *cyclone* 4 yang membuat temperature total dalam *calciner* terjaga.
- b. Komposisi pembakaran yang paling efisien dari variasi sekam 5, 7.5, 10, 12.5 dan 15 % adalah pada komposisi 15 % dimana hampir seluruh proses pembakaran terjadi secara sempurna ditandai dengan menurunnya mass fraction CO yang signifikan.

#### **5.2 Saran**

Berikut ini adalah saran yang diberikan peneliti oleh untuk keberlanjutan penelitian yang dilakukan:

- a. Perlu dilakukan permodelan pembakaran serentak yang dapat merepresentasikan keadaan pembakaran serentak atau *co firing* yang terjadi pada SL *calciner*.
- b. Perlu dilakukan analisis pengaruh dominansi variasi pada variasi campuran bahan bakar.
- c. Perlu dilakukan penelitian dengan perbedaan variasi yang lebih besar.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

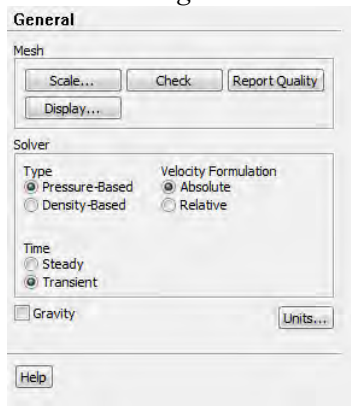
- [1] Atmaja, I. G. D., 2014. *Analisis Landscape Capacity Industri Semen Di Pulau Jawa*, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- [2] N.A. Madloul, d., 2011. A Critical Review On Energy Use And Savings In The Cement Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 2042–2060.
- [3] R.M. Farisa, d., 2013. Evaluasi Efisiensi Panas Dan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Rotary Kiln Pabrik Semen. *TEKNIK*, p. Vol. 34 No. 1.
- [4] Dai, J. et al., 2008. Overview and Some Issues Related to Co-Firing. *THE CANADIAN JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING*, 86(3), pp. 367-386.
- [5] Hye, A. A., 2014. *Computational Fluid Dynamics (CFD) Study Of Cofiring Of Coal And Pretreated Biomass*, Stockholm: KTH Industrial Engineering and Management.
- [6] Van Loo, S., 2007. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London: Earthscan.
- [7] Warnatz. J., U. M. D. R., 2006. *Combustion : Physical and Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutan Formation 4th edition*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

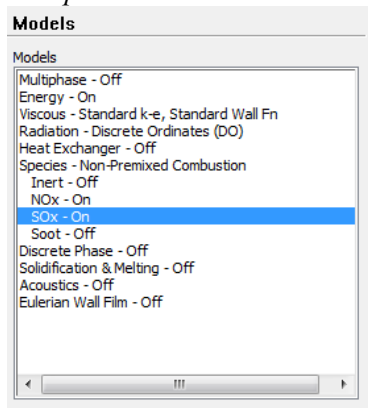
## LAMPIRAN

*Set up pada preprocessing simulasi computational fluid dynamics*  
ANSYS Fluent 14.1

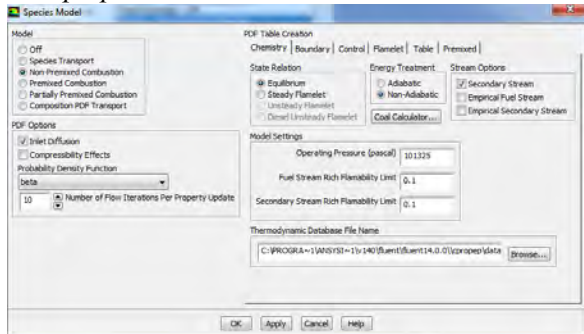
### a. *General Setting*



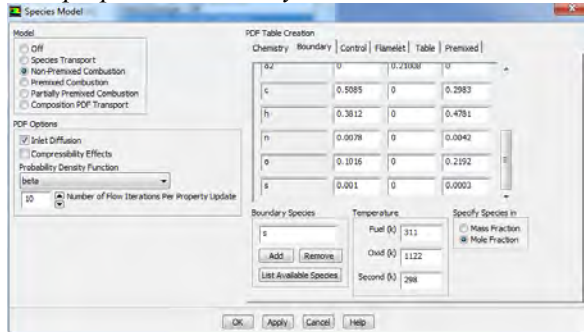
### b. *Set up Model Pembakaran*



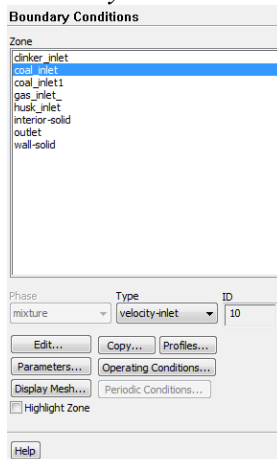
c. *Set up Species Model*



d. *Set up Species Boundary*

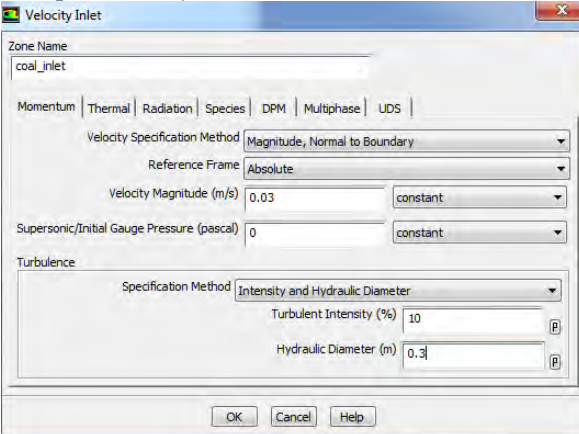


e. *Boundary Condition*





f. *Set up Boundary Condition*



Velocity Inlet

Zone Name  
coal\_inlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS |

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 0.03 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

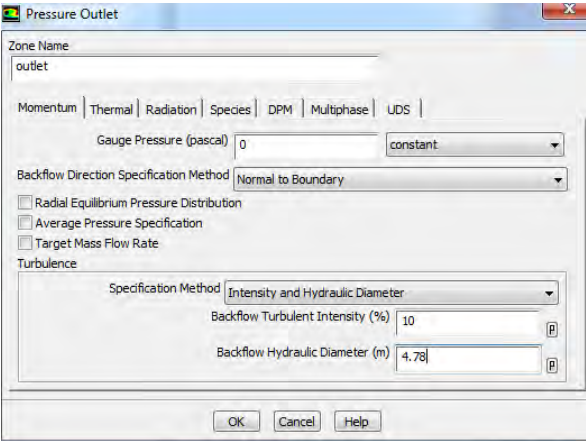
Turbulence

Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter

Turbulent Intensity (%): 10

Hydraulic Diameter (m): 0.3

OK Cancel Help



Pressure Outlet

Zone Name  
outlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS |

Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary

☐ Radial Equilibrium Pressure Distribution

☐ Average Pressure Specification

☐ Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter

Backflow Turbulent Intensity (%): 10

Backflow Hydraulic Diameter (m): 4.78

OK Cancel Help

g. *Solution Method*

**Solution Methods**

Pressure-Velocity Coupling

Scheme  
SIMPLE

Spatial Discretization

Gradient  
Least Squares Cell Based

Pressure  
Standard

Momentum  
Second Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy  
Second Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate  
Second Order Upwind

Transient Formulation  
First Order Implicit

☐ Non-Iterative Time Advancement

☐ Frozen Flux Formulation

☐ High Order Term Relaxation Options...

Default

Help

h. *Solution Control*

**Solution Controls**

Under-Relaxation Factors

Pressure  
0.3

Density  
1

Body Forces  
1

Momentum  
0.7

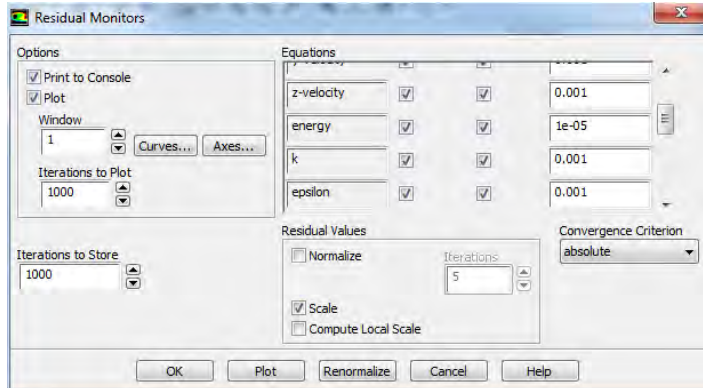
Turbulent Kinetic Energy  
0.8

Default

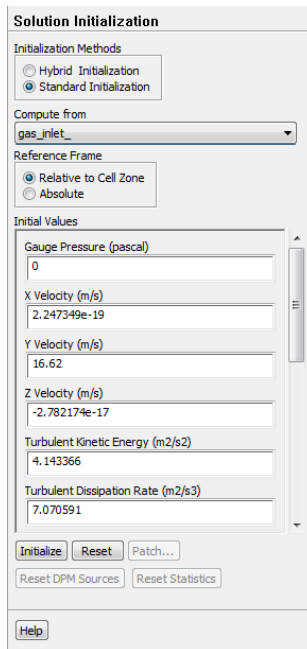
Equations... Limits... Advanced...

Help

i. *Residual Monitor*



j. *Solutin Initialization*



k. *Run Calculation*

**Run Calculation**

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed Time Step Size (s): 0.5 [p]

Settings... Number of Time Steps: 4 [▲ ▼]

Options

☐ Extrapolate Variables

☐ Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1 [▲ ▼] Sampling Options...

Time Sampled (s): 0

Max Iterations/Time Step: 200 [▲ ▼] Reporting Interval: 1 [▲ ▼]

☐ Postprocess Pollutants

Profile Update Interval: 1 [▲ ▼]

Data File Quantities... Acoustic Signals...

Calculate

Help

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Gresik, Jawa Timur pada tanggal 18 Januari 1996. Tamat SDN Kutorejo I Tuban (2008), SMP Negeri 11 Tuban (2010) dan SMA Negeri I Tuban (2012). Setelah tamat SMA, penulis melanjutkan studinya ke jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis ketika menempuh perkuliahan adalah Bidang Minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Selama menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam beberapa organisasi kemahasiswaan, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika pada periode 2014-2015. Pada kegiatan akademik, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Pengalaman *internship* yang dimiliki penulis dilakukan di PT. Semen Indonesia (Persero) TBK khususnya di Pabrik Tuban. Pada program *internship* tersebut, penulis melakukan analisis *techno-economy* penggunaan sekam pada *preheater SLC* Pabrik Tuban 1. Penulis dapat dihubungkan melalui alamat email [endahlaksmi@gmail.com](mailto:endahlaksmi@gmail.com)